

МНОГОЗВЕННЫЕ ГАСИТЕЛИ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ

© 2018 А.Н. Головин

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

Статья поступила в редакцию 03.12.2018

В статье приводятся результаты исследований динамических характеристик акустических гасителей колебаний жидкости при продольной распределённости параметров. Показывается, что для улучшения характеристик гасителей их целесообразно делать многозвенными.

Ключевые слова: пульсации давления, гасители колебаний, динамические характеристики, распределенные параметры.

Для демпфирования пульсаций давления в гидравлических системах машин часто применяют устройства – пассивные акустические гасители, схемы которых построены по принципу электрических фильтров нижних частот.

Фильтры нижних частот эффективно пропускают частотный спектр колебаний ниже некоторой частоты (частота среза) и подавляют частоты колебаний выше этой частоты. Степень подавления амплитуд колебаний каждой частоты зависит от вида фильтра.

В схемах *пассивных акустических гасителей* используют активные и реактивные элементы. В качестве реактивных элементов в устройствах применяют отрезки трубопроводов зауженного сечения – инерционности и ёмкости (отрезки трубопроводов увеличенного внутреннего сечения), выполняющие роли упругостей.

Сопrotивление пульсирующему потоку реактивных элементов зависит от частоты колебаний. Комбинациями таких элементов можно добиться ослабления гармоник с нужными частотами. Степенью ослабления колебаний можно управлять введением в конструкцию устройств активных элементов. В качестве активных элементов применяют гидравлические дроссели с линейными или нелинейными характеристиками.

Реализация гидравлических схем гасителей, построенных по принципу электрических фильтров нижних частот, может быть разнообразной, включая каскадные и параллельные соединения базовых однозвенных схем устройств [1, 2]. Примеры однозвенных схем устройств, выбранных в качестве базовых, и их электрические аналоги приведены на рис. 1.

Обобщённые зависимости коэффициентов передачи таких схем гасителей как акустических четырёхполюсников при учёте продольной распределённости параметров в Головин Александр Николаевич, доктор технических наук, профессор. E-mail: golovin@mail.ru

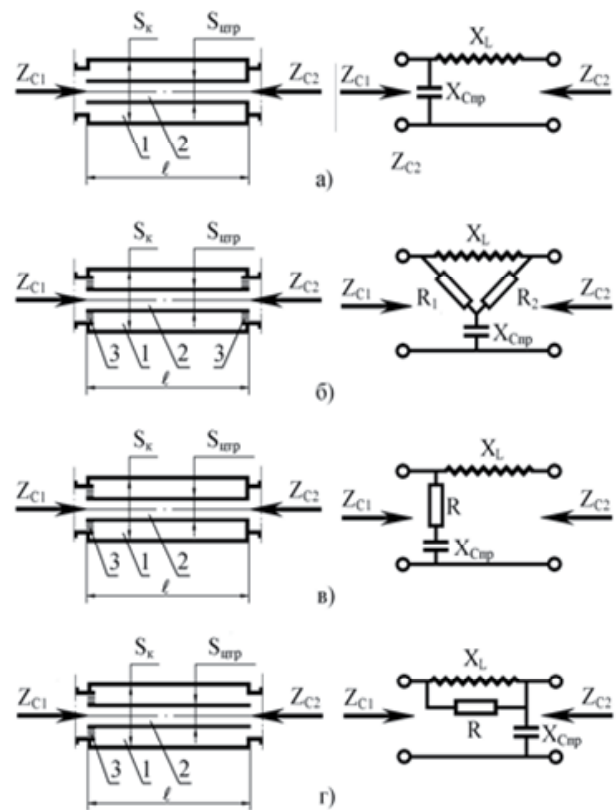


Рис. 1. Принципиальные гидравлические схемы базовых однозвенных гасителей и их электрические аналоги:

- 1 – расширительная полость; 2 – проточный канал;
- 3 – гидродроссели (активные сопротивления);
- $S_x, S_{шр}$ – площади поперечных сечений расширительной полости и проточного канала;
- l – длина гасителей (продольные размеры расширительных полостей и проточных каналов равны);
- X_L – инерционное сопротивление проточного канала;
- $X_{Cсп}$ – приведенное упругое сопротивление расширительной полости;
- R_i – сопротивление гидродросселей;
- Z_{ci} – волновые сопротивления гасителей

реактивных элементах устройств и не учёте диссипативных потерь в этих элементах имеют вид [2]:

$$\left. \begin{aligned}
 A(\bar{\ell}) &= \frac{\cos(2\pi\bar{\ell})}{P(\bar{\ell})} \left\langle S^2(S+1)(\bar{X}_1 + \bar{X}_2)^2 + \left\{ \left[(S+1)^2 + \bar{X}_1\bar{X}_2S^2 \right]^2 - \bar{X}_1(\bar{X}_1 + \bar{X}_2) \times \right. \right. \\
 &\times (S+1)S^3 \left. \right\} \text{tg}^2(2\pi\bar{\ell}) + j\bar{X}_1S \left[(S+1)^2 + \bar{X}_1\bar{X}_2S^2 \right] S\sqrt{S+1} \cdot \text{tg}^3(2\pi\bar{\ell}) \left. \right\rangle; \\
 B(\bar{\ell}) &= \frac{Z_{\text{вх}} \sin(2\pi\bar{\ell})}{P(\bar{\ell})\sqrt{S+1}} \left\langle (\bar{X}_1 + \bar{X}_2)(S+1)^2 S^2 \text{tg}(2\pi\bar{\ell}) + j\sqrt{S+1} \left\{ S^2(S+1)(\bar{X}_1 + \bar{X}_2)^2 + \right. \right. \\
 &+ \left. \left. \left[(S+1) + \bar{X}_1\bar{X}_2S^2 \right] \left[(S+1)^2 + \bar{X}_1\bar{X}_2S^2 \right] \text{tg}^2(2\pi\bar{\ell}) \right\} \right\rangle; \\
 C(\bar{\ell}) &= \frac{\sin(2\pi\bar{\ell})}{P(\bar{\ell})Z_{\text{вх}}\sqrt{S+1}} \left\langle S^4(S+1)\bar{X}_1\bar{X}_2(\bar{X}_1 + \bar{X}_2) \text{tg}(2\pi\bar{\ell}) + j\sqrt{S+1} \left\{ S^2(S+1)^2 \times \right. \right. \\
 &\times (\bar{X}_1 + \bar{X}_2)^2 + \left. \left. \left[(S+1)^3 + \bar{X}_1\bar{X}_2S^2 \right] \left[(S+1)^2 + \bar{X}_1\bar{X}_2S^2 \right] \text{tg}^2(2\pi\bar{\ell}) \right\} \right\rangle; \\
 D(\bar{\ell}) &= \frac{\cos(2\pi\bar{\ell})}{P(\bar{\ell})} \left\langle S^2(S+1)(\bar{X}_1 + \bar{X}_2)^2 + \left\{ \left[(S+1)^2 + \bar{X}_1\bar{X}_2S^2 \right]^2 - \bar{X}_2(\bar{X}_1 + \bar{X}_2) \times \right. \right. \\
 &\times (S+1)S^3 \left. \right\} \text{tg}^2(2\pi\bar{\ell}) + j\bar{X}_2S \left[(S+1)^2 + \bar{X}_1\bar{X}_2S^2 \right] S\sqrt{S+1} \cdot \text{tg}^3(2\pi\bar{\ell}) \left. \right\rangle,
 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где:

$$P(\bar{\ell}) = S^2(S+1)(\bar{X}_1 + \bar{X}_2)^2 + \left[(S+1)^2 + \bar{X}_1\bar{X}_2S^2 \right]^2 \text{tg}^2(2\pi\bar{\ell});$$

$$S = \frac{S_k}{S_{\text{ц}}}; \quad \bar{\ell} = \frac{\beta_k}{2\pi} = \frac{\beta_{\text{ц}}}{2\pi} = \frac{\ell}{\lambda}; \quad \bar{X}_i = \frac{X_i \sqrt{S+1}}{Z_{\text{вх}}} \quad \text{где:} \quad (2)$$

В формулах (1), (2) обозначения следуют

$$\beta_k = \frac{\omega l_k}{\alpha}; \quad \beta_{\text{ц}} = \frac{\omega l_{\text{ц}}}{\alpha} \quad \text{– постоянные распро-}$$

странения колебаний (безразмерные частоты) в расширительной полости и проточном кана-

ле гасителя; $Z_{\text{вх}} = \frac{\rho}{S_{\text{ц}}} \alpha$ – волновое сопротив-

ление проточного канала; α, ρ – скорость звука в рабочей жидкости и её плотность; $l_k, l_{\text{ц}}, S_k, S_{\text{ц}}$ – соответственно, длины и площади поперечных сечений расширительной полости и проточного канала; $S = S_k/S_{\text{ц}}$ – степень расширения; $l_{\text{ц}} = l_k = \ell$; λ, ω – соответственно длина волны и круговая частота подавляемых колебаний; X_i – сопротивления элементов, шунтирующих расширительную полость устройств; $i = 1, 2$.

Эффективность сглаживания пульсирующего потока жидкости акустическими гасителями зависит от их характеристик: коэффициента собственного затухания – $\hat{E}\hat{n}(\bar{\ell})$ и волновых сопротивлений – $Zc_i(\bar{\ell})$. Обычно $Zc_1(\bar{\ell})$ – волновое сопротивление гасителя со стороны входа

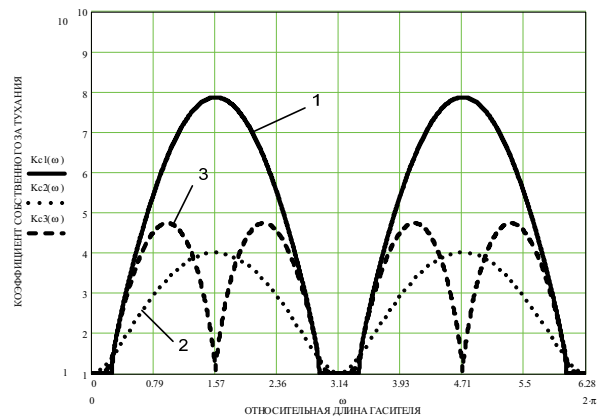


Рис. 2. Зависимости коэффициентов собственного затухания различных схем гасителей:

1 – схема приведена на рис. 1а, 2 – схема приведена на рис. 1б, 3 – схема приведена на рис. 1г.

в устройство; $Zc_1(\bar{\ell})$ – волновое сопротивление гасителя со стороны выхода. Зависимости $\hat{E}\hat{n}(\bar{\ell})$ и $Zc_1(\bar{\ell})$ определяются формулами:

$$\begin{aligned}
 \hat{E}\hat{n}(\bar{\ell}) &= \left| \sqrt{A(\bar{\ell}) \cdot D(\bar{\ell})} + \sqrt{B(\bar{\ell}) \cdot C(\bar{\ell})} \right|, \\
 Zc_1(\bar{\ell}) &= \sqrt{A(\bar{\ell}) \cdot B(\bar{\ell}) / C(\bar{\ell}) \cdot D(\bar{\ell})}, \quad (3) \\
 Zc_2(\bar{\ell}) &= \sqrt{D(\bar{\ell}) \cdot B(\bar{\ell}) / C(\bar{\ell}) \cdot A(\bar{\ell})}
 \end{aligned}$$

Графики собственных характеристик приведённых на рис.1 схем гасителей в зависимо-

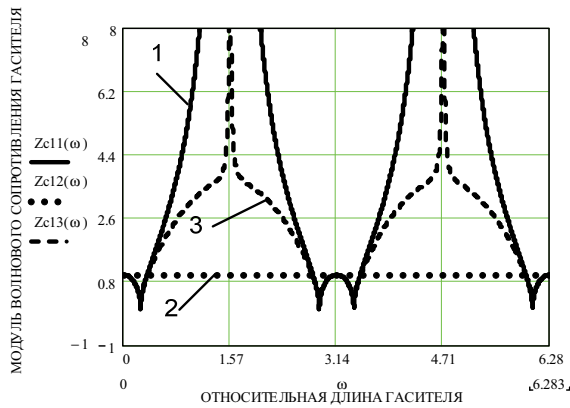


Рис. 3. Модули волновых сопротивлений различных схем гасителей:

1 - схема приведена на рис. 1а, 2 – схема приведена на рис. 1б, 3 – схема приведена на рис. 1г

сти от относительной длины устройств показаны на рис.2 и рис. 3 [2]: на рис. 2 – зависимости коэффициента $\hat{E}\hat{n}(\bar{\ell})$, на рис. 3 – зависимости модулей волновых сопротивлений $Zc1(\bar{\ell})$. На графиках индексами: “1” помечены характеристики гасителя, приведённого на рис. 1а, “2” – характеристики гасителя, приведённого на рис. 1б, “3” – характеристики гасителя, приведённого на рис.1г. Графики: с индексами “1” построены при значениях $\bar{X}_1 = \infty, \bar{X}_2 = 0$; с индексами “2” построены при значениях $\bar{X}_1 = 1, \bar{X}_2 = 1$; с индексами “3” построены при значениях $\bar{X}_1 = 4, \bar{X}_2 = 0$.

Зависимости характеристик $\hat{E}\hat{n}(\bar{\ell})$ и $Zci(\bar{\ell})$ периодические, период π . Внутри интервала периодичности поведение зависимостей различное. Однако для гарантированного подавления колебаний необходимо, чтобы в рабочем диапазоне частот у гасителя реализовывались максимальные значения коэффициента $\hat{E}\hat{n}(\bar{\ell})$ и активные волновые сопротивления [1, 2]. У приведённых схем устройств этому условию в большей степени соответствует схема на рис. 1б, известная как гаситель с активными волновыми сопротивлениями – графики 2 [1, 2]. Основным недостатком схемы является небольшие по сравнению с другими гасителями значения коэффициента $\hat{E}\hat{n}(\bar{\ell})$. Этот недостаток можно устранить изменением конструкции устройства – выполнить её многозвенной при сохранении продольных и поперечных габаритов установленных в однозвенном варианте устройства. Зависимости коэффициентов $\hat{E}\hat{n}(\bar{\ell})$ для однозвенного и двухзвенного варианта гасителя показаны на рис.4.

Из анализа графиков следует, что при низких частотах небольшое преимущество в величине

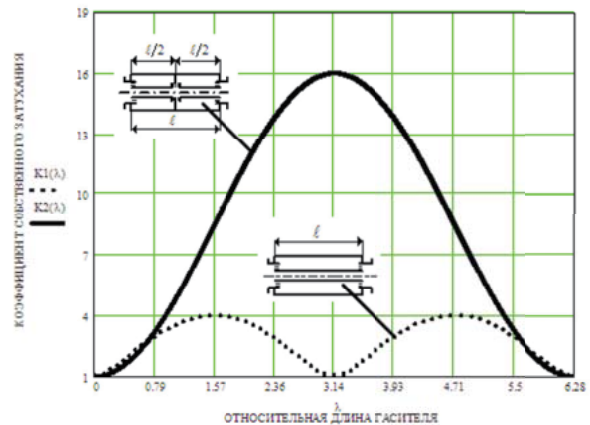


Рис. 4. Влияние структуры гасителя на коэффициент собственного затухания

$\hat{E}\hat{n}(\bar{\ell})$ имеет однозвенная схема устройства. При высоких частотах эффективность двухзвенного устройства становится существенно выше. Интервал периодичности характеристик двухзвенного гасителя больше чем у однозвенного устройства – равен 2π . Максимальное значение $\hat{E}\hat{n}(\bar{\ell})$ у двухзвенного устройства реализуется при относительной частоте колебаний равной π . У однозвенного гасителя при этой частоте реализуется полоса пропускания.

На рис. 5, 6, 7 приведены графики, иллюстрирующие изменения зависимостей $\hat{E}\hat{n}(\bar{\ell})$ при модификации базовой однозвенной структуры гасителя. На рис. 5 показаны зависимости $\hat{E}\hat{n}(\bar{\ell})$ при преобразовании однозвенной структуры гасителя в трёхзвенную, на рис. 6 – при преобразовании однозвенной структуры гасителя в четырёхзвенную, на рис. 7 – при преобразовании однозвенной структуры гасителя в пятизвенную.

Из анализа графиков, приведённых на рис. 4 – рис. 7 следует, что тенденция увеличения значений коэффициента $\hat{E}\hat{n}(\bar{\ell})$ при одновременном увеличении непрерывного интервала затухания является преимуществом многозвенных схем гасителей по сравнению с однозвенными устройствами. При увеличении числа ячеек, на которые продольно разбивается структура базового гасителя, интервал периодичности собственных характеристик вновь сформированного многозвенного устройства также увеличивается пропорционально количеству ячеек. При периоде собственных характеристик базового однозвенного гасителя – π , период характеристик устройства состоящего из n ячеек будет равен $n\pi$. Это позволяет расширять частотный диапазон работы устройства при увеличении его эффективности действия внутри интервала периодичности. Зависимость коэффициента собственного затухания многозвен-

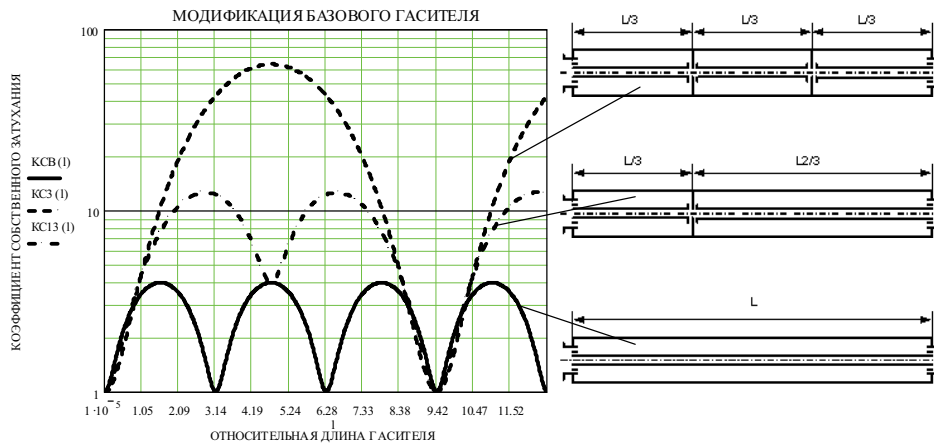


Рис. 5. Зависимости коэффициентов $\hat{E}\hat{n}(\bar{\ell})$ при преобразовании базового однозвенного гасителя в трёхзвенный

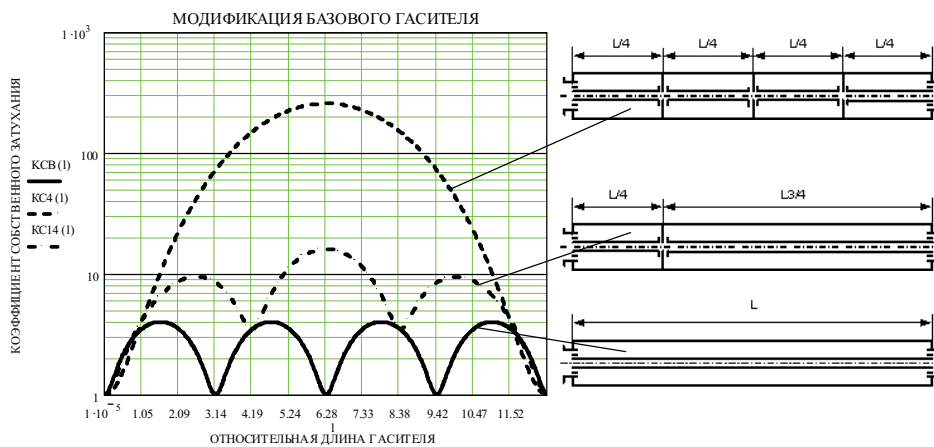


Рис. 6. Зависимости коэффициентов $\hat{E}\hat{n}(\bar{\ell})$ при преобразовании базового однозвенного гасителя в четырёхзвенный гаситель

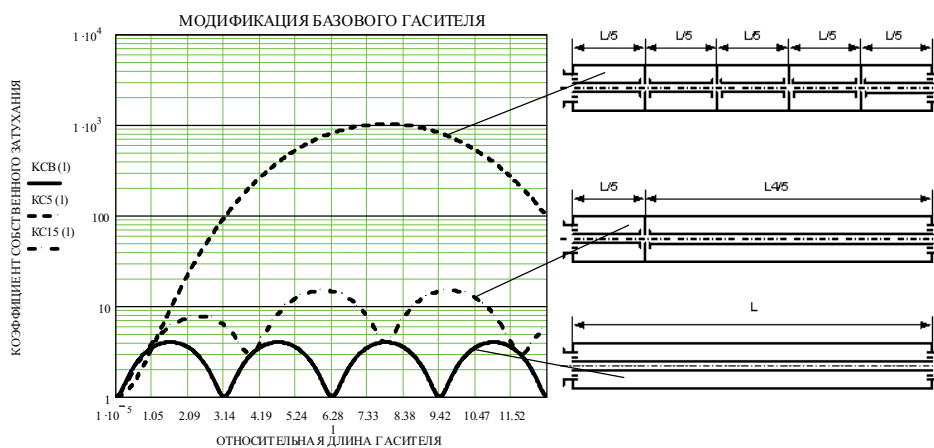


Рис. 7. Зависимости коэффициентов $\hat{E}\hat{n}(\bar{\ell})$ при преобразовании базового однозвенного гасителя в пятизвенный гаситель

ного устройства при условии реализации $\bar{X}_1 = \bar{X}_2 = 1$ определяется по формуле

$$\hat{E}\hat{n}(\bar{\ell}) = \left(\sqrt{1 + S \cdot \sin\left(\frac{\bar{\ell}}{n}\right)} \right)^n. \quad (4)$$

Соотношение (4) позволяет определить частотный диапазон, в котором у базовой однозвенной схеме гасителя реализуются большие, чем у многозвенных структур значения коэффициента собственного затухания. Оценку проведём с помощью выражения

$$\Delta \hat{\epsilon}_{i1}(\bar{\ell}) = \hat{\epsilon}_{i1}(\bar{\ell}) / \hat{\epsilon}_{i1}(\bar{\ell}) \quad (5)$$

В формуле (5) $\hat{\epsilon}_{i1}(\bar{\ell})$ – зависимость коэффициента собственного затухания базового однозвенного гасителя; $\hat{\epsilon}_{i1}(\bar{\ell})$ – зависимость коэффициента собственного затухания соответствующего многозвенного гасителя; $i = 2, 3, 4, 5$ – число звеньев в гасителе. При расчётах по формулам (4), (5) для формирования рис. 8 принято значение степени расширения $S=30$.

Графики на рис. 8 показывают, что у гасителей, имеющих несколько звеньев значения коэффициента собственного затухания в низкочастотной области меньше (кривые 1 – 4) чем у базовой схемы при одинаковых продольных габаритах сравниваемых устройств. Для повышения эффективности действия многозвенного гасителя в низкочастотной области необходимо применять дополнительные мероприятия.

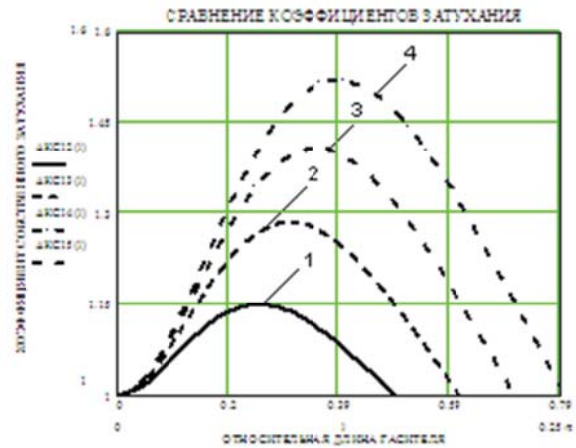


Рис. 8. Зависимости отношений коэффициентов собственного затухания:
 1 – базового однозвенного и двухзвенного гасителей;
 2 – базового однозвенного и трёхзвенного гасителей;
 3 – базового однозвенного и четырёхзвенного гасителей;
 4 – базового однозвенного и пятизвенного гасителей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шорин В.П. Устранение колебаний в авиационных трубопроводах. М.: Машиностроение, 1980. 156 с.
2. Головин А.Н., Шорин В.П. Гасители колебаний для гидравлических систем. Самара: Изд-во Самарского научного центра РАН, 2005. 168 с.

MULTI-SECTION DAMPERS OF PRESSURE PULSATIONS

© 2018 A.N. Golovin

Samara National Research University named after academician S.P. Korolyov

The article presents the results of studies of the dynamic characteristics of acoustic dampers of oscillations of the liquid at the longitudinal distribution of parameters. It is shown that to improve the characteristics of dampers it is advisable to make them multi-section.

Keywords: pressure pulsations, vibration dampers, dynamic characteristics, distributed parameters.